

·综述·

低剂量电离辐射职业接触人群的健康效应研究进展

高宇 赵凤玲 王平 吕玉民

河南省职业病防治研究院毒理研究室，郑州 450052

通信作者：吕玉民，Email：lym636160@sina.com

【摘要】 职业性低剂量电离辐射给放射工作人员带来的健康风险备受关注。笔者结合国内外低剂量电离辐射所致健康效应的调查和研究进行综述，讨论目前放射生物学领域重点研究的健康效应的主要类型及发生机制，为放射工作人员的职业安全保护和职业健康监护提供参考。

【关键词】 辐射，电离；放射工作人员；健康效应

基金项目： 河南省重点科技攻关项目(142102310086)；河南省医学科技攻关计划(联合共建)项目(LHGJ20190815)

DOI：[10.3760/cma.j.cn121381-201904013-00050](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-201904013-00050)

Research progress in the health effects of radiation workers induced by low-dose ionizing radiation

Gao Yu, Zhao Fengling, Wang Ping, Lyu Yumin

Department of Toxicology, Henan Institute for Occupational Medicine, Zhengzhou 450052, China

Corresponding author: Lyu Yumin, Email: lym636160@sina.com

【Abstract】 The severe health risks of radiation workers occupationally exposed to low-dose ionizing radiation cannot be ignored. According to domestic and foreign investigations and studies on the health effects caused by low-dose ionizing radiation, this review discusses the main types and mechanisms of the health effects currently being studied in the field of radiobiology, and provides a reference for occupational safety protection and health surveillance of radiation workers.

【Key words】 Radiation, ionizing; Radiation workers; Health effects

Fund programs: Key Technology Research Project of Henan Province (142102310086); Medical Science and Technology Project of Henan Province (LHGJ20190815)

DOI：[10.3760/cma.j.cn121381-201904013-00050](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-201904013-00050)

低剂量电离辐射 (low dose ionizing radiation, LDIR) 是与人类关系最密切的辐射类型，主要来源于天然本底辐射和医疗照射。1991 年，联合国原子辐射效应科学委员会将 LDIR 定义为剂量低于 200 mGy 或剂量率低于 0.1 mGy/min (1 h 以内或 1 h 以上的平均剂量率) 的 X 射线或 γ 射线的外照射^[1]。与中等或较大剂量辐射所致的生物学效应相比，LDIR 致机体损伤效应的类型、发生方式和机制更为多样和复杂。尽管短时间内的 LDIR 暴露不足以引起临幊上可观察到的急性放射损伤，但长期暴露可能会引起严重的、不可逆的有害效应。随着电离辐射在能源、工业、农业和医疗等方面广泛的

应用，放射工作人员成为 LDIR 的主要受照群体，其长期受照所致的健康效应受到国内外研究者的重视和关注。我们结合国内外研究成果，对 LDIR 所致放射工作人员职业健康效应的研究进展进行综述，为放射工作人员的健康监护及辐射防护策略的制定提供依据和参考。

1 血细胞指标改变

机体不同组织和器官对电离辐射的敏感程度不同，其中，造血系统的辐射敏感性最高。放射线可减弱造血干细胞的自我更新能力，造成骨髓急性或持久性抑制，从而导致造血功能低下和外周血中有

形细胞异常，主要表现为以中性粒细胞为主的 WBC、RBC 和血小板(platelets, PLT)数量减少，血红蛋白(hemoglobin, Hb)含量下降^[2]。Maks 等^[3]的动物实验结果表明，暴露于高剂量率和低剂量率质子及 γ 射线的小鼠的 WBC 数量呈剂量依赖性降低。Caciari 等^[4]报道，与对照组相比，放射工作人员的总 WBC 平均值及其分布均显著降低。李建杰等^[5]的流行病学分析结果显示，放射工作人员的 RBC、PLT 及淋巴细胞数量与其工龄呈负相关，即随着工龄的延长而逐渐减少。但也有文献报道，放射工作人员的 WBC 和 RBC 数量及 Hb 含量有随工龄增加而升高的趋势，这可能是由于机体造血系统损伤与辐射修复同时存在，长期 LDIR 使机体代偿能力增强，产生了一定的适应性^[6]。随后，有研究者进一步比较了不同工种放射性工作人员的外周血象指标，结果发现，介入放射工作人员的 WBC 异常率高于从事普通影像诊断的人员($P<0.05$)，这提示介入放射工作人员的健康可能更易受到损害^[7]。张其波等^[8]的研究结果也显示，不同累积剂量的放射工作人员 WBC、RBC 和 PLT 数量及 Hb 含量有明显差异($P<0.05$)，但与损伤无明显的剂量-效应关系。此外，有研究者发现，人外周血淋巴细胞的不同功能亚群对电离辐射的敏感程度不同，目前公认的辐射敏感性从高到低的淋巴细胞依次为 CD8⁺ T 淋巴细胞、B 淋巴细胞和 CD4⁺ T 淋巴细胞^[9]。总而言之，外周血象指标的改变可能有助于评估 LDIR 所致造血系统损伤的程度及辐射危害效应。

2 甲状腺功能异常

甲状腺作为人体最大的内分泌腺体，极易受到电离辐射的影响，从而产生形态和(或)功能的改变，甲状腺结节是甲状腺异常最为显著的表现。长期 LDIR 可能对甲状腺功能有抑制或损害作用^[10-12]。Ron^[13]发现，接触低、中剂量电离辐射的人群，其甲状腺结节和甲状腺腺瘤的发生率随暴露剂量的增加而升高。Lee 等^[14]也发现，医疗机构中放射工作人员的甲状腺癌发病率略高于一般人群，但未显示与剂量有关。涂雷等^[15]对医疗机构中放射工作人员的甲状腺结节进行横断面研究，结果发现，放射工作人员的甲状腺结节异常率明显升高，且与剂量和工龄呈正相关($P<0.05$)。我国最新发布的《放

射性甲状腺疾病诊断标准》^[16]中规定血清 T₃ 和 T₄ 水平降低，TSH 水平升高，并有明显的甲状腺功能减退的症状和体征为临床型甲状腺功能减退；而亚临床甲状腺功能减退则只有 TSH 水平升高，血清 T₃ 和 T₄ 水平正常。高锦等^[17]的研究结果显示，我国放射工作人员的血清 T₃ 和 T₄ 水平均较对照组降低，但 TSH 水平升高，且差异均有统计学意义。陈满连和李鹤展^[18]的研究结果显示，放射工作人员的血清 T₃ 水平高于非放射工作人员，而 TSH 水平则明显较低。朱春华和朱玉华^[19]对从事介入治疗的放射工作人员的甲状腺功能进行检查，结果发现，与从事 X 射线诊断的人员相比，介入放射工作人员的血清 T₃ 和 T₄ 水平偏高，TSH 水平偏低($P<0.05$)。但目前学术界在 LDIR 对甲状腺功能的影响方面存在争议，也有部分研究未发现放射医务人员的甲状腺功能有明显改变。因此，开展大样本人群的健康监护及机制研究，深入探讨放射线对医疗放射工作人员甲状腺的损伤及其机制是必要的。

3 眼晶状体损伤

放射性白内障在放射损伤中占据重要地位，眼晶状体是电离辐射的敏感器官之一。国外很多研究者从分子、细胞水平以及人群队列上证明，长期 LDIR 可增加眼晶状体混浊的检出率和患放射性白内障的风险，且射线接触者的眼晶状体混浊主要发生在后极后囊下皮质内，而非射线接触者主要是前囊下的混浊^[20-22]。Jacob 等^[22]发现，放射工作人员，尤其是介入放射工作人员，眼晶状体后囊下混浊的发生率明显高于非放射工作人员。与此同时，国内的受照人群数据和实验动物模型研究也得出一致结论，如 Zhou 等^[23]发现，与正常人群相比，放射工作人员白内障的发病年龄明显降低。张艳艳等^[24]发现，电离辐射对眼晶状体的损伤存在性别差异，女性的眼晶状体异常率略高于男性($P<0.05$)，这可能与男女体质、潜伏期和遗传基因等多方面的差异有关。潘志峰等^[25]的研究结果显示，累积受照剂量 $>5 \text{ mSv}$ 或放射工龄 >10 年者的晶状体混浊患病率明显升高，且介入放射工作人员的眼晶状体混浊患病率明显高于其他工种的放射工作人员。邵云平等^[26]的报道也显示，与从事放射诊断和治疗工作的人员相比，从事核医学和介入放射学的工作人员更容易发生后囊下眼晶状体混浊。总的来说，LDIR 对眼

晶状体的损伤作用较为明显，这提示放射工作人员，尤其是介入放射工作人员，在职业活动中应加强眼部防护(如配戴防护眼镜等)，并做好剂量监测及健康监护工作，有条件者可开展眼晶状体剂量监测工作。2012年，国际放射防护委员会特别建议，应降低职业照射的眼晶状体剂量限值，推荐连续5年的平均当量剂量不超过20 mSv，任何一年的当量剂量不超过50 mSv^[27]。这为我国国家标准的修订以及加强放射工作人员眼晶状体的辐射防护提供了科学依据。

4 生殖功能障碍

电离辐射对生殖系统的危害主要表现为对性腺(睾丸和卵巢)的损伤作用。即使是LDIR也会破坏生殖细胞并影响配子的产生和(或)功能，可导致暂时或持久性的精子缺乏或不孕，使受照者的生育能力降低甚至完全丧失^[28]。有研究者指出，睾丸的受照剂量>0.46 Gy时将影响生精上皮的生精能力，剂量越大，生物效应越严重，但这不是一种绝对的线性剂量-效应关系^[29]。Grewenig等^[30]对受辐射小鼠的睾丸细胞DNA损伤进行研究，结果发现，即使是极低剂量的电离辐射(100 mGy或10 mGy)，也可以诱导睾丸细胞的DNA双链断裂，促使精原细胞凋亡，从而影响精子生成。流行病学调查结果发现，与非射线接触者相比，在男性射线接触者中可观察到更高质量的DNA断片和高甲基化精子($P<0.05$)，这表明职业性LDIR暴露可能破坏精子遗传和表观遗传完整性^[31]。女性卵巢对电离辐射同样敏感，辐射暴露可使女性卵巢功能紊乱，引起卵巢早衰，降低女性生育能力。胡丽等^[32]发现，接触放射线是女性不孕的影响因素，其发生不孕的危险性是非射线接触者的1.679倍。尽管有报告证实LDIR(<0.5 Gy)不会造成人卵原细胞凋亡，但Pesty等^[33]认为，极低剂量的电离辐射也会导致原始卵泡和成熟卵巢中初级卵泡的急剧减少以及窦前卵泡的卵泡闭锁增加，从而增加女性不孕、遗传和致畸的风险。电离辐射也可诱导精子和卵细胞的染色体畸变，影响胚胎发育，增加子代致畸风险。因此，放射工作人员，尤其是妊娠期或哺乳期妇女，应增强自我防护意识，在职业活动中注意佩戴适当的防护用品，降低生殖系统损伤的风险，防止对子代产生不良后果。

此外，有流行病学调查结果显示，人类的出生性别比例也可作为遗传健康或遗传损害的指标，电离辐射可使暴露人群后代的性别比发生变化，且父亲与母亲暴露所产生的性别比有所差异^[34]。Scherb和Voigt^[35]发现，切尔诺贝利核事故后，欧洲的性别比大幅度上升，大约每10年增加0.42%；德国和瑞士的核设施在运行期间，35 km范围内的性别比从0.3%增加至0.4%。但Yadollahi等^[36]的研究结果表明，与非放射接触者相比，男性放射工作者生育男孩的概率减少。总而言之，电离辐射暴露对性别比的影响及其机制仍不明确，未来可作为辐射生殖效应研究的一个重点方向进行深入研究。

5 免疫功能改变

长期LDIR暴露可能会通过多种途径影响免疫系统的功能。联合国原子辐射效应科学委员会认为，LDIR可通过引起机体免疫功能紊乱或炎症反应以诱导疾病的发生^[37]，但其机制尚不明确，这可能与LDIR使T细胞亚群，尤其是辅助性T细胞亚群的数量和功能发生变化，影响参与调节免疫应答的各种细胞因子的水平，从而改变机体免疫功能和状态有关。动物实验结果表明，小鼠经低剂量(0.075~0.200 Gy)全身照射后，白细胞介素(interleukin, IL)-10水平明显降低($P<0.05$)^[38]；人群调查结果同样显示，从事放射诊断、放射治疗和介入放射学工作的男性的IL-10表达水平均低于正常人群($P<0.05$)^[39]。IL-10可通过抑制IL-12来抑制1型辅助性T细胞的分化和增殖^[40]，而IL-10水平降低则表明其介导的体液免疫受到抑制，从而促进1型辅助性T细胞分化。此外，Godekmerdan等^[41]的流行病学研究结果显示，长期LDIR暴露对细胞和体液免疫水平的弱化主要表现为CD4⁺T细胞的减少，CD4/CD8比值及免疫球蛋白水平的降低。

然而，学术界关于LDIR对免疫细胞的影响仍存在很大争议。部分研究并未发现长期LDIR接触人群T细胞和B细胞等的明显变化^[42]；还有学者认为LDIR具有免疫刺激作用，可使某些细胞因子的分泌增加，从而提高机体的免疫监视和调节能力，如我国阳江高本底居民的血清IL-2水平和p53基因表达水平增高，这提示长期LDIR暴露可能会增强机体免疫^[43]。李小凯和张伶^[44]发现，放射工作

人员的免疫球蛋白A和免疫球蛋白B含量随着工龄的延长而增加，这表明长期 LDIR 暴露可刺激免疫球蛋白的分泌，从而增强免疫系统功能。Karimi 等^[45]报道，与正常人群相比，放射工作人员的血清 γ -干扰素水平升高，IL-4 水平降低，因此认为 LDIR 暴露可刺激机体免疫功能以抵抗肿瘤细胞或致病因子，从而降低各种疾病的患病率。

6 细胞遗传学效应

DNA 是辐射生物效应的主要靶分子，电离辐射可通过诱导单链和双链断裂，碱基位点改变或碱基氧化发挥其遗传毒性作用。外周血淋巴细胞染色体畸变(chromosomal aberrations, CAs)和微核是评价辐射损伤最常用的细胞遗传学指标。CAs 可直接反映 DNA 损伤，其中，双着丝粒体因其极低的本底值和辐射特异性成为生物剂量学中估算生物剂量的“金标准”^[46]。大多数研究结果表明，与正常人群相比，低剂量射线接触者外周血淋巴细胞 CAs 率显著升高^[47]。Saberi 等^[48]报道，医疗机构中从事血管造影的放射工作人员体内观察到的 CAs 率显著高于从事放疗和 CT 扫描的工作人员 ($P<0.05$)。本实验室最近的研究发现，医疗行业放射工作人员具有更高的无着丝粒断片、双着丝粒体和易位率，且易位率随年有效剂量的增加而升高 ($P<0.05$)^[49]。因此，应继续开展放射工作人员外周血淋巴细胞 CAs 分析，尤其重点关注介入工作人员的 CAs 率，进一步分析其与放射工龄和累积受照剂量的关系。

微核是细胞内染色体断片或有丝分裂过程中丢失的整条染色体，在分裂后期不能被纳入子核而游离在细胞质中所形成的单个或多个小核。研究证明，辐射诱发的微核率和 CAs 率存在良好的相关性，可间接反映机体的辐射损伤程度^[47,50]。外周血淋巴细胞微核检测亦是评价职业受照人群辐射生物效应的一种简便实用的细胞遗传学指标^[50]。近年来，本实验室和其他国内学者的报道均显示，介入医学工作人员的微核率高于从事放射诊断和治疗等工种的人员，但与暴露剂量未见明显相关性^[50-52]，而国外学者的研究结果表明，LDIR 暴露人群的微核率随暴露时间的增加而升高(0.303 微核/年)^[53]。然而，该指标在评价放射工作人员辐射损伤的敏感性上仍存在争议，也有研究并未发现 LDIR 对医疗机构中放射工作人员的外周血淋巴细胞微核率有明

显影响^[54]。因此，微核对于评价辐射损伤敏感性的问题仍需进一步探讨。

7 小结与展望

综上所述，大量证据表明电离辐射没有安全剂量，即使是 LDIR 也会对机体的分子、细胞、组织及器官造成损害。随着电离辐射在各行各业的广泛应用，放射工作人员职业性 LDIR 暴露所致的健康风险不容忽视。由于机体不同组织器官对电离辐射的敏感程度不同，目前学术界对放射工作人员健康效应的研究主要聚焦于造血系统、甲状腺、眼晶状体和性腺等组织器官的形态和功能改变。尽管大多数研究结果表明，职业性 LDIR 暴露会对放射工作人员，尤其是核医学和介入放射学工作人员的上述组织器官造成不良影响，且低剂量辐射损伤更为明显，但仍有部分研究者对此提出异议，其结果的不一致性主要体现在这些生物学改变与对照组相比，差异是否有统计学意义，以及是否与放射工龄、工种和辐射剂量有关。实践证明，外周血淋巴细胞 CAs 是现有的评价 LDIR 所致放射工作人员辐射损伤最敏感的指标，在尚未发现新的特异性生物标志物之前，应继续开展放射工作人员外周血淋巴细胞 CAs 分析^[55]。此外，近年来 LDIR 诱导的机体“适应性反应”及“兴奋效应”成为放射生物学领域的研究热点，但其生物学机制尚不明确。

因此，进一步对 LDIR 所致放射工作人员的健康效应进行研究，探索其发生发展的生物学机制是十分必要的。可建立我国放射工作人员的队列研究，进一步探讨 LDIR 对放射工作人员健康的影响，在随访中对放射工作人员可能发生的疾病做到早发现、早诊断和早治疗，以期最大程度保证放射工作人员的健康与安全。此外，考虑到 LDIR 诱导的适应性反应，加强受照人群的免疫学相关指标的研究是有意义的。在使用电离辐射造福于民的同时，如何利用电离辐射诱导的兴奋效应和适应性反应，将辐射有害效应尽可能减少至合理的最低水平是未来研究的重要方向和长远目标。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展，不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 高宇负责资料的收集、综述的撰写；赵凤玲、王平负责综述的审阅和修改；吕玉民负责指导综述的撰写和修订。

参考文献

- [1] Wakeford R, Tawn EJ. The meaning of low dose and low dose-rate[J]. *J Radiol Prot*, 2010, 30(1): 1–3. DOI: [10.1088/0952-4746/30/1/E02](https://doi.org/10.1088/0952-4746/30/1/E02).
- [2] Yoshida K, French B, Yoshida N, et al. Radiation exposure and longitudinal changes in peripheral monocytes over 50 years: the adult health study of atomic-bomb survivors[J]. *Br J Haematol*, 2019, 185(1): 107–115. DOI: [10.1111/bjh.15750](https://doi.org/10.1111/bjh.15750).
- [3] Maks CJ, Wan XS, Ware JH, et al. Analysis of white blood cell counts in mice after gamma- or proton-radiation exposure[J]. *Radiat Res*, 2011, 176(2): 170–176. DOI: [10.1667/RR2413.1](https://doi.org/10.1667/RR2413.1).
- [4] Caciari T, Capozzella A, Tomei F, et al. Professional exposure to ionizing radiations in health workers and white blood cells[J]. *Ann Ig*, 2012, 24(6): 465–474. DOI: [10.1016/j.jinorgbio.2011.09.019](https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2011.09.019).
- [5] 李建杰, 莫素芳, 张静波, 等. 低剂量电离辐射对人体外周血象影响流行病学分析[J]. *医学动物防制*, 2016, 32(10): 1146–1148. DOI: [10.7629/ydwfz201610028](https://doi.org/10.7629/ydwfz201610028).
- Li JJ, Mo SF, Zhang JB, et al. Epidemiological analysis of low-dose ionizing radiation on peripheral blood index[J]. *J Med Pest Contrl*, 2016, 32(10): 1146–1148. DOI: [10.7629/ydwfz201610028](https://doi.org/10.7629/ydwfz201610028).
- [6] 温薇, 苏世标, 肖斌, 等. 介入放射工作人员血细胞指标的分析[J]. *中国辐射卫生*, 2016, 25(4): 434–437. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.019](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.019).
- Wen W, Su SB, Xiao B, et al. The analysis of blood cells in interventional radiology staff[J]. *Chin J Radiol Health*, 2016, 25(4): 434–437. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.019](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.019).
- [7] 牛丽梅, 吴小琴, 雷红玉, 等. 介入放射工作人员细胞遗传学效应观察[J]. *工业卫生与职业病*, 2015, 41(4): 292–293. DOI: [10.13692/j.cnki.gwsysyb.2015.04.014](https://doi.org/10.13692/j.cnki.gwsysyb.2015.04.014).
- Niu LM, Wu XQ, Lei HY, et al. The analysis of cytogenetic effects in interventional radiology staff[J]. *Ind Hlth & Occup Dis*, 2015, 41(4): 292–293. DOI: [10.13692/j.cnki.gwsysyb.2015.04.014](https://doi.org/10.13692/j.cnki.gwsysyb.2015.04.014).
- [8] 张其波, 焦永法, 刘京伟, 等. 长期低剂量职业照射对放射工作者健康影响[J]. *中国公共卫生*, 2015, 31(3): 362–364. DOI: [10.11847/zggws2015-31-03-33](https://doi.org/10.11847/zggws2015-31-03-33).
- Zhang QB, Jiao YF, Liu JW, et al. Health effects of long-term exposure to low-dose occupational radiation among radiology workers[J]. *Chin J Public Health*, 2015, 31(3): 362–364. DOI: [10.11847/zggws2015-31-03-33](https://doi.org/10.11847/zggws2015-31-03-33).
- [9] 杨峥嵘, 吴玉章. 电离辐射对淋巴细胞影响的研究进展[J]. *免疫学杂志*, 2002, 18(3): 139–141. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8861.2002.z1.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8861.2002.z1.042).
- Yang ZR, Wu YZ. Advances in effects of ionizing radiation on lymphocytes[J]. *Immunol J*, 2002, 18(3): 139–141. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8861.2002.z1.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8861.2002.z1.042).
- [10] Lubin JH, Adams MJ, Shore R, et al. Thyroid cancer following childhood low dose radiation exposure: a pooled analysis of nine cohorts[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2017, 102(7): 2575–2583. DOI: [10.1210/jc.2016-3529](https://doi.org/10.1210/jc.2016-3529).
- [11] 吕扬阳, 王志斌, 张洋, 等. 医用电离辐射对放射工作人员甲状腺功能及结节的影响[J]. *职业与健康*, 2018, 34(4): 446–449. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127).
- Lyu YY, Wang ZB, Zhang Y, et al. Influence of medical ionizing radiation on thyroid function and nodules of radiation workers[J]. *Occup Health*, 2018, 34(4): 446–449. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127).
- [12] Kitahara CM, Preston DL, Neta G, et al. Occupational radiation exposure and thyroid cancer incidence in a cohort of U.S. radiologic technologists, 1983–2013[J]. *Int J Cancer*, 2018, 143(9): 2145–2149. DOI: [10.1002/ijc.31270](https://doi.org/10.1002/ijc.31270).
- [13] Ron E. Thyroid cancer incidence among people living in areas contaminated by radiation from the Chernobyl accident[J]. *Health Phys*, 2007, 93(5): 502–511. DOI: [10.1097/01.HP.0000279018.93081.29](https://doi.org/10.1097/01.HP.0000279018.93081.29).
- [14] Lee WJ, Preston DL, Cha ES, et al. Thyroid cancer risks among medical radiation workers in South Korea, 1996–2015[J/OL]. *Environ Health*, 2019, 18(1): 19[2019-04-03]. <https://ehjournal.biomedcentral.com>. DOI: [10.1186/s12940-019-0460-z](https://doi.org/10.1186/s12940-019-0460-z).
- [15] 涂雷, 宋海燕, 董秋, 等. 低剂量电离辐射对医疗职业人群甲状腺结节患病的影响[J]. *现代医学*, 2017, 45(1): 1–5. DOI: [10.3969/j.issn.1671-7562.2017.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7562.2017.01.001).
- Tu L, Song HY, Dong Q, et al. Effect of exposure to low-dose ionizing radiation on the prevalence of thyroid nodules in medical occupational population[J]. *Modern Med J*, 2017, 45(1): 1–5. DOI: [10.3969/j.issn.1671-7562.2017.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7562.2017.01.001).
- [16] 中华人民共和国卫生部. GBZ 101—2011 放射性甲状腺疾病诊断标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Ministry of Health of People's Republic of China. GBZ 101—2011 Diagnostic criteria for radiation thyroid diseases[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [17] 高锦, 瞿述根, 沈月平, 等. 低剂量电离辐射对放射工作人员甲状腺功能影响的Meta分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37(10): 777–785. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.011](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.011).
- Gao J, Zhai SG, Shen YP, et al. Effect of low dose ionizing radiation on thyroid function in radiation workers: a meta analysis[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37(10): 777–785. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.011](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.011).
- [18] 陈满连, 李鹤展. 长期低剂量电离辐射对甲状腺形态或功能的影响[J]. *实用中西医结合临床*, 2017, 17(4): 52–53. DOI: [10.13638/j.issn.1671-4040.2017.04.030](https://doi.org/10.13638/j.issn.1671-4040.2017.04.030).
- Chen ML, Li HZ. Effect of exposure to low-dose ionizing radiation on the morphology and function of thyroid[J]. *Pract Clin J Integr Tradit Chin West Med*, 2017, 17(4): 52–53. DOI: [10.13638/j.issn.1671-4040.2017.04.030](https://doi.org/10.13638/j.issn.1671-4040.2017.04.030).
- [19] 朱春华, 朱玉华. 介入放射诊疗操作医师所受剂量和健康状况调查[J]. *职业卫生与应急救援*, 2016, 34(4): 270–274. DOI: [10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2016.04.002](https://doi.org/10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2016.04.002).
- Zhu CH, Zhu YH. Exposure level and health condition of

- medical doctors engaging in intervention radiology[J]. *Occup Health Emerg Rescue*, 2016, 34(4): 270–274. DOI: 10.16369/j. other.issn.1007-1326.2016.04.002.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会. GBZ 95—2014 职业性放射性白内障的诊断[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China. GBZ 95—2014 Diagnostic criteria for occupational radiation cataract[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [21] Little MP, Kitahara CM, Cahoon EK, et al. Occupational radiation exposure and risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists[J]. *Eur J Epidemiol*, 2018, 33(12): 1179–1191. DOI: 10.1007/s10654-018-0435-3.
- [22] Jacob S, Boveda S, Bar O, et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study[J]. *Int J Cardiol*, 2013, 167(5): 1843–1847. DOI: 10.1016/j.ijcard.2012.04.124.
- [23] Zhou DD, Yao L, Guo KM, et al. Cytogenetic evaluation of cataract patients occupationally exposed to ionizing radiation in northeast China[J/OL]. *Genet Mol Res*, 2016, 15(3): 15038687 [2019-04-03]. <https://www.geneticsmr.com/browse/journal-archive>. DOI: 10.4238/gmr.15038687.
- [24] 张艳艳, 李侠, 白金, 等. 低剂量电离辐射对医院放射工作人员眼晶状体的影响[J]. *中国辐射卫生*, 2015, 24(5): 497–498. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.05.019.
Zhang YY, Li X, Bai J, et al. Effect of exposure to low-dose ionizing radiation on the lens in medical occupational population[J]. *Chin J Radiol Health*, 2015, 24(5): 497–498. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.05.019.
- [25] 潘志峰, 毛雪松, 李卫国. 420 例放射工作人员眼晶状体检查结果分析[J]. *中国辐射卫生*, 2014, 23(6): 515–516. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.06.016.
Pan ZF, Mao XS, Li WG. Analysis of lens among 420 radiation workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2014, 23(6): 515–516. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.06.016.
- [26] 邵云平, 许雪春, 孙全富, 等. 730 名放射工作人员眼晶状体混浊风险分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2014, 34(2): 136–139. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2014.02.015.
Shao YP, Xu XC, Sun QF, et al. Analysis of lens opacity among 730 radiation workers[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2014, 34(2): 136–139. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2014.02.015.
- [27] Authors on behalf of ICRP, Stewart FA, Akleyev AV, et al. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs —threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context[J]. *Ann ICRP*, 2012, 41(1-2): 1–322. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.02.001.
- [28] Lin CM, Chang WP, Doyle P, et al. Prolonged time to pregnancy in residents exposed to ionizing radiation in cobalt-60-contaminated buildings[J]. *Occup Environ Med*, 2010, 67(3): 187–195. DOI: 10.1136/oem.2008.045260.
- [29] 郭凯琳, 刘玉龙. 电离辐射对男性生殖及内分泌功能的影响[J]. *辐射防护通讯*, 2016, 36(5): 6–9. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2016.05.003.
- Guo KL, Liu YL. Effects of ionizing radiation on male reproductive and endocrine functions[J]. *Radiat Prot Bulletin*, 2016, 36(5): 6–9. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2016.05.003.
- [30] Grewenig A, Schuler N, Rübe CE. Persistent DNA damage in spermatogonial stem cells after fractionated low-dose irradiation of testicular tissue[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2015, 92(5): 1123–1131. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.04.033.
- [31] Kumar D, Salian SR, Kalthur G, et al. Semen abnormalities, sperm DNA damage and global hypermethylation in health workers occupationally exposed to ionizing radiation[J/OL]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e69927[2019-04-03]. <http://www.plosone.org>. DOI: 10.1371/journal.pone.0069927.
- [32] 胡丽, 方丽艳, 沈壮, 等. 某市 9944 名女职工生殖系统患病情况及其职业相关因素分析[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2018, 36(2): 118–121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2018.02.010.
Hu L, Fang LY, Shen Z, et al. Prevalence of reproductive system diseases among female workers in a city and related occupational influencing factors: an analysis of 9944 cases[J]. *Chin J Ind Hyg Occup Dis*, 2018, 36(2): 118–121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2018.02.010.
- [33] Pesty A, Doussau M, Lahaye JB, et al. Whole-body or isolated ovary ⁶⁰Co irradiation: Effects on *in vivo* and *in vitro* folliculogenesis and oocyte maturation[J]. *Reprod Toxicol*, 2010, 29(1): 93–98. DOI: 10.1016/j.reprotox.2009.10.007.
- [34] Scherb H, Kusmierz R, Voigt K. Increased sex ratio in Russia and Cuba after Chernobyl: a radiological hypothesis[J/OL]. *Environ Health*, 2013, 12: 63[2019-04-03]. <https://ehjournal.biomedcentral.com>. DOI: 10.1186/1476-069X-12-63.
- [35] Scherb H, Voigt K. The human sex odds at birth after the atmospheric atomic bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2011, 18(5): 697–707. DOI: 10.1007/s11356-011-0462-z.
- [36] Yadollahi M, Farahmand M, Karajizadeh M, et al. The effect of radiation on secondary sex ratio among radiologists in Shiraz, Iran[J/OL]. *Iran J Health Safety Environ*, 2018, 5(3): 1072–1076[2019-04-03]. <http://www.ijhse.ir/index.php/IJHSE/article/view/316>.
- [37] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Biological mechanisms of radiation at low doses[M]. New York: United Nation Publication, 2012: 18.
- [38] 孙宝娟, 董娟聪, 王金虎, 等. 电离辐射对小鼠免疫器官不同亚群 T 淋巴细胞调节因子的影响[J]. *吉林大学学报·医学版*, 2011, 37(6): 985–988. DOI: 10.13481/j.1671-587x.2011.06.001.
Sun BW, Dong JC, Wang JH, et al. Effects of ionizing radiation on regulatory factors in different subsets of T lymphocytes of immune organs in mice[J]. *J Jilin Univ: Med Ed*, 2011, 37(6): 985–988. DOI: 10.13481/j.1671-587x.2011.06.001.
- [39] 温微, 杨宇华, 同雪华, 等. 医学放射工作人员血清免疫相关细

- 胞因子变化研究[J]. *中国职业医学*, 2017, 44(2): 193–197. DOI: [10.11763/j.issn.2095-2619.2017.02.013](https://doi.org/10.11763/j.issn.2095-2619.2017.02.013).
- Wen W, Yang YH, Yan XH, et al. Research on the change of serum immune cytokines in medical radiation workers[J]. *Chin Occup Med*, 2017, 44(2): 193–197. DOI: [10.11763/j.issn.2095-2619.2017.02.013](https://doi.org/10.11763/j.issn.2095-2619.2017.02.013).
- [40] Tahvanainen J, Kyläniemi MK, Kanduri K, et al. Proviral integration site for Moloney murine leukemia virus (PIM) kinases promote human T helper 1 cell differentiation[J]. *J Biol Chem*, 2013, 288(5): 3048–3058. DOI: [10.1074/jbc.m112.361709](https://doi.org/10.1074/jbc.m112.361709).
- [41] Godekmerdan A, Ozden M, Ayar A, et al. Diminished cellular and humoral immunity in workers occupationally exposed to low levels of ionizing radiation[J]. *Arch Med Res*, 2004, 35(4): 324–328. DOI: [10.1016/j.arcmed.2004.04.005](https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2004.04.005).
- [42] Rees GS, Daniel CP, Morris SD, et al. Occupational exposure to ionizing radiation has no effect on T- and B-cell total counts or percentages of helper, cytotoxic and activated T-cell subsets in the peripheral circulation of male radiation workers[J]. *Int J Radiat Biol*, 2004, 80(7): 493–498. DOI: [10.1080/095553000410001725099](https://doi.org/10.1080/095553000410001725099).
- [43] 李坤, 李小娟, 王海军, 等. 阳江天然放射性高本底地区居民血清免疫学调查研究[J]. *中国预防医学杂志*, 2013, 14(10): 774–778. DOI: [10.16506/j.1009-6639.2013.10.003](https://doi.org/10.16506/j.1009-6639.2013.10.003).
- Li K, Li XJ, Wang HJ, et al. Immunobiological study among healthy residents in the high background radiation area of Yangjiang, China[J]. *Chin Prev Med*, 2013, 14(10): 774–778. DOI: [10.16506/j.1009-6639.2013.10.003](https://doi.org/10.16506/j.1009-6639.2013.10.003).
- [44] 李小凯, 张伶. 放射作业人员免疫球蛋白含量与工作年限的相关性分析[J]. *西南国防医药*, 2013, 23(4): 402–404. DOI: [10.3969/j.issn.1004-0188.2013.04.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-0188.2013.04.020).
- Li XK, Zhang L. Correlation between immunoglobulin level and length of service in radiation-exposed workers[J]. *Xinanguofangyiyao*, 2013, 23(4): 402–404. DOI: [10.3969/j.issn.1004-0188.2013.04.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-0188.2013.04.020).
- [45] Karimi G, Balali-Mood M, Alamdaran SA, et al. Increase in the Th1-cell-based immune response in healthy workers exposed to low-dose radiation-immune system status of radiology staff[J]. *J Pharmacopuncture*, 2017, 20(2): 107–111. DOI: [10.3831/KPI.2017.20.014](https://doi.org/10.3831/KPI.2017.20.014).
- [46] Voisin P. Standards in biological dosimetry: a requirement to perform an appropriate dose assessment[J]. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, 2015, 793: 115–122. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2015.06.012](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2015.06.012).
- [47] 吕玉民. 染色体畸变在急、慢性辐射损伤评估中的意义专家解析[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(4): 349–354, 360. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.04.001](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.04.001).
- Lyu YM. Expert interpretation on the significance of chromosomal aberration in the assessment of acute and chronic radiaiton damage[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28(4): 349–354, 360. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.04.001](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.04.001).
- [48] Saberi A, Salari E, Latifi SM. Cytogenetic analysis in lymphocytes from radiation workers exposed to low level of ionizing radiation in radiotherapy, CT-scan and angiography units[J]. *Mutat Res*, 2013, 750(1–2): 92–95. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.10.001).
- [49] 吕玉民, 田梅, 王平, 等. 医疗行业放射工作人员染色体畸变水平的影响因素分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2020, 40(4): 278–283. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.04.006](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.04.006).
- Lyu YM, Tian M, Wang P, et al. Influence factors of chromosomal aberration levels in radiation workers in hospitals[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2020, 40(4): 278–283. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.04.006](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.04.006).
- [50] 李杰, 韩林, 王平, 等. 921名放射工作人员个人年有效剂量与外周血淋巴细胞微核率关系分析[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(5): 487–490. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.05.004](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.05.004).
- Li J, Han L, Wang P, et al. Analysis of individual annual efficient dose and micronucleus results in peripheral blood lymphocytes of 921 radiation workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28(5): 487–490. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.05.004](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.05.004).
- [51] 郝建秀, 姜立平, 王彦, 等. 天津市1411例放射工作人员淋巴细胞微核率分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37(11): 863–865. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.11.012](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.11.012).
- Hao JX, Jiang LP, Wang Y, et al. Analysis of lymphocyte micronucleus for 1411 radiation workers in Tianjin[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37(11): 863–865. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.11.012](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.11.012).
- [52] 周齐红, 俞慧娟, 付风云, 等. 放射工作人员外周血淋巴细胞染色体畸变和微核率分析[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2016, 34(4): 275–277. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2016.04.009](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2016.04.009).
- Zhou QH, Yu HJ, Fu FY, et al. Chromosome aberration and micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes in radiation workers[J]. *Chin J Ind Hyg Occup Dis*, 2016, 34(4): 275–277. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2016.04.009](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2016.04.009).
- [53] Pajic J, Jovicic D, Ps Milovanovic A. Micronuclei as a marker for medical screening of subjects continuously occupationally exposed to low doses of ionizing radiation[J]. *Biomarkers*, 2017, 22(5): 439–445. DOI: [10.1080/1354750X.2016.1217934](https://doi.org/10.1080/1354750X.2016.1217934).
- [54] Cardoso RS, Takahashi-Hyodo S, Peitl P Jr, et al. Evaluation of chromosomal aberrations, micronuclei, and sister chromatid exchanges in hospital workers chronically exposed to ionizing radiation[J]. *Teratog Carcinog Mutagen*, 2001, 21(6): 431–439. DOI: [10.1002/tcm.1030](https://doi.org/10.1002/tcm.1030).
- [55] 高宇, 王平, 韩林, 等. 放射工作人员染色体畸变研究现状[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2018, 38(8): 635–640. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.08.015](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.08.015).
- Gao Y, Wang P, Han L, et al. The current research status on chromosomal aberrations of radiation workers[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2018, 38(8): 635–640. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.08.015](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.08.015).

(收稿日期: 2019-04-04)